

МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА
ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. М.В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи

Груздев Александр Николаевич

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА АТМОСФЕРНОГО
ОЗОНА И СВЯЗАННЫХ С НИМ ГАЗОВЫХ ПРИМЕСЕЙ**

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2007

Работа выполнена в Институте физики атмосферы им. А.М. Обухова
Российской Академии наук

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук	Кожевников Валентин Николаевич
доктор физико-математических наук	Нерушев Александр Федорович
доктор физико-математических наук	Погорельцев Александр Иванович

Ведущая организация: Институт вычислительной математики Российской
академии наук

Защита состоится «18» октября 2007 г. в «15» часов
на заседании диссертационного совета Д 501.001.63
при Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова
по адресу 119991 Москва, Ленинские горы, ГСП-1, МГУ им. М.В. Ломоносова,
Физический факультет, аудитория

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Физического
факультета МГУ

Автореферат разослан « » сентября 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

В.Б. Смирнов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Введение. Атмосферный озон, концентрация которого в воздухе на различных высотах измеряется лишь миллионными и даже миллиардными долями, является, тем не менее, одним из важнейших атмосферных газов в силу своих оптических и химических свойств. Поглощение озоном биологически активного компонента ультрафиолетовой солнечной радиации служит основным механизмом, регулирующим интенсивность этой радиации на поверхности Земли и, таким образом, наличие озонового щита является жизненно важным для существования разнообразных форм жизни на Земле. Поглощение озоном коротковолновой солнечной радиации и излучение в инфракрасной области спектра (в окрестности 9.6 мкм) служат важнейшими составляющими радиационного и термического баланса атмосферы. Наличие стратосферного озонового слоя радикальным образом влияет на температурную стратификацию стратосферы и, тем самым, оказывает важное воздействие на динамические процессы и климат стратосферы. Благодаря высокой химической активности озон играет важнейшую роль в химических процессах в различных слоях атмосферы. Участвуя во множестве реакций, он влияет на содержание других малых газовых составляющих атмосферы, обладающих важными радиационными или химическими свойствами. В свою очередь, фотохимический баланс озона существенно зависит от концентраций других малых примесей атмосферы из разных химических семейств.

Из малых атмосферных примесей, кроме озона, в диссертации рассмотрены, в частности, двуокись азота NO_2 , закись азота N_2O , азотная кислота HNO_3 , метан CH_4 . Двуокись азота – важнейший компонент семейства окислов азота, которое вносит основной вклад в химическое разрушение озона в средней стратосфере. Присутствие NO_2 необходимо для фотохимического образования озона в нижней тропосфере. Метан и закись азота – важнейшие после углекислого газа парниковые газы атмосферы. Кроме того, закись азота служит основным источником окислов азота в стратосфере, а метан – важным

источником гидроксила ОН в тропосфере и стратосфере. Метан – также важнейший поставщик водяного пара в стратосфере и мезосфере, который тоже является важным источником гидроксила. Цепочка окисления метана приводит к образованию перегидроксила водорода HO_2 , который, наряду с гидроксидом ОН, играет важнейшую роль в фотохимии тропосферного и стратосферного озона. Азотная кислота служит важным резервуаром химически активных окислов азота в нижней стратосфере, а ее вымывание в тропосфере – основным механизмом удаления химически активных азотсодержащих соединений из атмосферы.

Актуальность проблемы исследования. Чрезвычайно важная роль озона и связанных с ним атмосферных примесей в радиационных, химических и динамических процессах в атмосфере определяет актуальность всестороннего исследования их пространственно-временной изменчивости. О серьезном внимании, уделяемом изучению озона и других атмосферных примесей, свидетельствует большое число национальных и международных программ в рамках Всемирной метеорологической организации (ВМО) и Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК). Подписание в 1987 г. Монреальского протокола было направлено на предотвращение начавшегося истощения стратосферного озонного слоя. Регулярно наблюдавшееся в течение последних 20-25 лет сильное уменьшение содержания озона над южной полярной областью в весеннее время (антарктическая «озонная дыра») и обусловленное этим увеличение уровня биологически активной УФ радиации и климатические изменения в нижней тропосфере над Антарктикой и прилегающими областями подтвердили злободневность проблемы.

Цель и задачи. Целью работы является экспериментальное и теоретическое исследование вариаций содержания озона и других газовых атмосферных составляющих на различных временных масштабах с оценкой амплитудных и фазовых характеристик вариаций и выявлением их региональных и крупномасштабных особенностей.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи.

1. Изучение характеристик годового хода содержаний озона, двуокиси азота, закиси азота, метана, азотной кислоты.
2. Изучение особенностей и механизмов изменчивости содержания озона и двуокиси азота в полярных областях.
3. Изучение квазидвухлетних вариаций озона, температуры, давления, скорости ветра в стратосфере и тропосфере.
4. Изучение вариаций состава, температуры и динамики средней и верхней атмосферы под воздействием вариаций уровня солнечной активности.
5. Изучение эффектов долговременной изменчивости и трендов содержания озона и двуокиси азота в стратосфере; оценки долговременных изменений термического режима средней атмосферы.
6. Анализ спектральных и структурных закономерностей пространственно-временной изменчивости озона и двуокиси азота.

Научная новизна.

1. Впервые проведены наблюдения NO_2 в восточной Антарктиде и широком широтном секторе Атлантики северного и южного полушарий, получен уникальный материал о временной изменчивости и широтном распределении этой примеси. Получен первый и до сих пор единственный широтный профиль концентрации озона в приземном слое Антарктиды по измерениям с самолета. Впервые по данным дистанционных спектрометрических измерений на Звенигородской научной станции ИФА РАН получен многолетний материал одновременных измерений содержания NO_2 в стратосфере и тропосфере.
2. Впервые выполнен анализ пространственной динамики основных фаз годового цикла содержания примесей, характеризующих различные режимы эволюции примесей в годовом ходе.
3. Обнаружены два режима квазидвухлетней цикличности зональной скорости ветра в экваториальной стратосфере с периодами 2 и 2.5 года. Вариации с такими же периодами обнаружены в концентрации озона,

температуре, давлении, скорости ветра в стратосфере и тропосфере внетропических широт северного полушария.

4. В различных атмосферных параметрах и концентрации озона обнаружены вариации с комбинационными частотами квазидвухлетней цикличности и годового цикла.

5. Показано, что квазидвухлетние вариации концентрации озона, температуры, давления, скорости ветра в тропосфере и стратосфере внетропических широт северного полушария обусловлены комбинированным влиянием Эль-Ниньо – Южного колебания, Североатлантического колебания и квазидвухлетней цикличности в экваториальной стратосфере.

6. Обнаружены и проанализированы эффекты воздействия 11-летнего цикла солнечной активности на годовой ход стратосферного озона и получены оценки вклада динамического переноса в 11-летние вариации концентрации стратосферного озона во внетропических широтах северного и южного полушарий. Показано, что термический и химический отклик атмосферы на 27-суточные вариации коротковолновой солнечной радиации имеет перемежающийся и нелинейный характер.

7. Предложен и рассмотрен новый механизм внутрисуточной и межсуточной изменчивости концентрации озона в приземном слое атмосферы в Антарктиде за счет изменений циркуляции с участием стокового ветра (холодного воздуха, стекающего по антарктическому куполу под действием силы тяжести). Получены первые результаты о содержании и изменении стратосферного содержания NO_2 в восточной Антарктиде.

8. Проанализированы первые широтные разрезы общего содержания NO_2 , полученные с помощью единого прибора, и выявлена тонкая структура широтного распределения NO_2 .

9. Впервые выявлены и оценены линейные тренды характеристик годового хода общего содержания озона. Получена и проанализирована неизвестная ранее широтная структура линейных трендов стратосферного содержания NO_2 .

10. Показано, что в долговременные изменения термического режима мезосферы могут вносить значительный вклад не только изменения концентраций радиационно-активных газов, но и вероятные долговременные изменения активности внутренних гравитационных волн.

11. Впервые показано, что спектры мощности флуктуаций содержания NO_2 в приземном слое атмосферы в диапазоне периодов от нескольких суток до нескольких месяцев подчиняются степенному закону с показателем около -0.4 . Обнаружено, что меридиональные вариации концентрации озона в стратосфере в диапазоне горизонтальных масштабов от 200 до 6500 км подчиняются закону статистического самоподобия, показатель которого зависит от высоты и сезона.

Достоверность научных положений и полученных результатов обусловлена большим объемом экспериментального материала, на основе которого сделаны основные выводы работы, подтверждением результатов с помощью различных методов анализа, использованием для интерпретации результатов наблюдений численных и аналитических моделей.

Научная и практическая значимость полученных результатов.

1. В работе решена крупная научная проблема исследования особенностей и механизмов пространственно-временной изменчивости атмосферного озона и связанных с ним малых газовых составляющих атмосферы (NO_2 , N_2O , HNO_3 , CH_4 и других), имеющих важное значение в формировании климата средней и верхней атмосферы.

2. Полученные автором закономерности вариаций содержания озона и двуокиси азота на различных временных масштабах, количественные оценки амплитуд и фаз вариаций этих примесей и характеристики их связи с изменениями циркуляции атмосферы и уровнем солнечной активности важны для понимания естественной изменчивости атмосферного озона и связанных с ним газовых примесей и прогноза межгодовых и многолетних изменений содержания озона.

3. Несомненную ценность представляют результаты исследований межгодовых и многолетних изменений общего содержания озона, позволяющие

вследствие этого осуществлять прогноз среднего уровня биологически активной ультрафиолетовой (УФ) солнечной радиации на поверхности Земли. Полученные автором результаты о квазидвухлетней цикличности общего содержания озона использованы для теоретической оценки межгодовых вариаций дозы УФ радиации, получаемой биосферой Арктики.

4. Усовершенствованная автором двумерная модель фотохимии, динамики и радиации атмосферы служит для изучения воздействия кратковременных и долговременных изменений содержания радиационно- и химически активных газов на температуру и состав средней атмосферы. Разработанная автором одномерная фотохимическая модель используется в задаче мониторинга NO_2 в стратосфере и тропосфере на Звенигородской научной станции ИФА РАН, в том числе при мониторинге загрязнения приземного слоя атмосферы окислами азота. Разработанная автором параметризация фотохимических процессов в уравнении переноса озона будет использована в климатической модели ИФА РАН.

5. Разработанная при активном участии автора методика измерений содержания NO_2 и результаты измерений содержания NO_2 на Звенигородской научной станции ИФА успешно используются для валидации спутниковых измерений содержания NO_2 . Звенигородская научная станция включена в состав Международной сети по обнаружению стратосферных изменений (Network for the Detection of Stratospheric Change – NDSC), а результаты регулярных измерений содержания NO_2 в столбе стратосферы на Звенигородской станции представлены в базе данных NDSC и доступны для использования.

6. Полученные автором результаты о пространственной и временной изменчивости атмосферного озона и других атмосферных примесей используются для тестирования атмосферных моделей.

7. Научная и практическая значимость выполненных автором исследований подтверждается также тем, что они проводились по программам ГНТП № 18, Президиума РАН № 16 и 30, международным программам MAP

(Middle Atmosphere Program), ARM (Atmospheric Radiation Measurements), международной программе Европейского космического агентства “Calibration and Validation of the Ozone Monitoring Instrument Data”, в рамках хоздоговорных работ, в составе 33-й и 34-й Советских антарктических экспедиций.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Амплитудные и фазовые характеристики сезонных изменений широтно-высотных полей содержания озона, метана, закиси азота, азотной кислоты, широтно-долготного поля общего содержания озона. Широтная структура характеристик годового и суточного хода стратосферного содержания двуокиси азота.

2. Исследование механизмов изменчивости содержания озона и двуокиси азота в полярных областях. Выявлен новый механизм внутрисуточной и межсуточной изменчивости приземного озона в Антарктиде под действием стоковых ветров. Выявлена связь вариаций стратосферного содержания NO_2 в Антарктике с эволюцией зимнего стратосферного циркумполярного вихря.

3. Результаты исследования квазидвухлетних вариаций общего содержания озона, концентрации озона, температуры, давления, скорости ветра в стратосфере и тропосфере. Выявлены два режима квазидвухлетних вариаций указанных параметров с периодами около 2 и 2.5 лет, а также колебания с периодами около 20 и 8.5 мес, соответствующими комбинационным частотам квазидвухлетних вариаций и годового цикла.

4. Результаты исследования вариаций состава, температуры и динамики средней и верхней атмосферы под воздействием вариаций уровня солнечной активности. Обнаружено влияние 11-летних вариаций солнечной активности на характеристики годового хода содержания стратосферного озона. Всесторонне исследован отклик средней и верхней атмосферы на вариации уровня солнечной активности с периодом 27 суток.

5. Оценки линейных трендов содержания двуокиси азота в стратосфере; оценки линейных трендов амплитудных и фазовых характеристик

годового хода общего содержания озона; оценки долговременных изменений термического режима средней атмосферы в результате возрастания концентраций парниковых газов и возможных долговременных изменений активности внутренних гравитационных волн.

Личный вклад. Все результаты, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Постановка всех научных задач и планирование экспериментов и экспедиций сделаны автором. Анализ результатов измерений и модельных расчетов, главным образом, выполнены автором. Автором разработаны использованные в диссертации аналитические модели, выполнено усовершенствование двумерной численной модели фотохимии, радиации и динамики атмосферы SOCRATES и проведены все использованные в диссертации расчеты на ней. Автор является инициатором, руководителем и непосредственным участником измерений содержания двуокиси азота в Антарктиде, Атлантике и на Звенигородской научной станции. Методика определения содержания NO_2 по результатам дистанционных спектрометрических измерений разработана при активном участии автора. Измерения концентрации озона в Антарктиде, представленные в диссертации, выполнены, главным образом, автором.

Апробация работы. По теме диссертации было сделано несколько десятков докладов на отечественных и международных симпозиумах, конференциях и совещаниях. Результаты работы докладывались на трех Четырехгодичных озонных симпозиумах (ФРГ, 1988 г.; США, 1992 г.; Греция, 2004 г.), на XVI (ФРГ, 1991 г.), XVII (Англия, 1992 г.), XVIII (ФРГ, 1993 г.), XIX (Франция, 1994 г.), XX (ФРГ, 1995 г.), XXI (Нидерланды, 1996 г.), XXVI (Франция, 2001 г.) и XXVII (Франция, 2002 г.) Генеральных ассамблеях Европейского геофизического общества, на 2-м (Норвегия, 1992 г.), 3-м (США, 1994 г.) и 4-м (Нидерланды, 1996 г.) Циркумполярных симпозиумах по дистанционному зондированию окружающей среды Арктики, на 31-й (Англия, 1996 г.), 32-й (Япония, 1998 г.) и 36-й (Китай, 2006 г.) Научных ассамблеях COSPAR, на 1-й (Австралия, 1996 г.) и 2-й (Аргентина, 2000 г.) Генеральных

ассамблеях SPARC, на V, X и XIV международных симпозиумах «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Россия, 1998, 2003 и 2007 гг.), на VI Всесоюзном симпозиуме по атмосферному озону (1985 г.), Всесоюзной конференции по атмосферному озону (1988 г.), Всесоюзной конференции «Взаимосвязь региональных и глобальных процессов в атмосфере и гидросфере» (1988 г.), Международном симпозиуме по исследованиям средней атмосферы (СССР, 1989 г.), Международной конференции «Климат северных широт» (Норвегия, 1990 г.), Симпозиуме по тропосферной химии антарктического региона (США, 1991 г.), V Совещании по атмосферной оптике (СССР, 1991 г.), Симпозиуме по наукам о средней атмосфере (Япония, 1992 г.), Международном рабочем совещании по электродинамике и составу мезосферы (Россия, 1992 г.), Международном симпозиуме по экологическим эффектам загрязнения окружающей среды Арктики (Исландия, 1993 г.), Международной конференции по прошлому, настоящему и будущему климату (Финляндия, 1995 г.), Международной конференции по озону в нижней стратосфере (Греция, 1995 г.), Шестой научной конференции Проекта по глобальной атмосферной химии (IGAC) (Италия, 1999 г.), Второй международной конференции «Состояние и охрана воздушного бассейна и водно-минеральных ресурсов курортно-рекреационных регионов» (Россия, 2000 г.); Международном радиационном симпозиуме (Россия, 2000 г.); Генеральной ассамблее IAMAS (Австрия, 2001 г.); Международном рабочем совещании «Развитие наземной сети наблюдений двуокиси азота в стратосфере» (Россия, 2001 г.), Международном симпозиуме стран СНГ «Атмосферная радиация» (Россия, 2002 г.), Объединенной ассамблее EGS-AGU-EGU (Франция, 2003 г.), Всемирной конференции по изменению климата (Россия, 2003 г.), Международной конференции по оптическим технологиям для изучения атмосферы, океана и окружающей среды (Китай, 2004 г.), Генеральной ассамблее EGU (Австрия, 2005 г.), Ассамблее IAMAS «Увлекательная атмосфера: изменяемая и изменчивая» (Китай, 2005 г.). Кроме того, результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на заседаниях

Ученого совета ИФА РАН, Президиума РАН, на Секции метеорологии и атмосферных наук Национального геофизического комитета России, на Межведомственных семинарах по атмосферному озону (ИФА РАН), на семинарах в ИФА РАН, Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (Санкт-Петербург), в Лаборатории аэрономии Национальной администрации по исследованиям океана и атмосферы (NOAA, Боулдер, США), в Институте исследований окружающей среды Кёльнского университета (Кёльн, Германия), на обсерватории Хоэнпайсенберг (Германия).

По теме диссертации опубликовано более 100 научных работ, в том числе 44 в ведущих рецензируемых отечественных и иностранных журналах и изданиях. Некоторые результаты диссертации опубликованы в отчете Всемирной метеорологической организации “Scientific Assessment of Stratospheric Ozone: 1989”. Автор диссертации был одним из ведущих авторов (Lead authors) первой главы отчета Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) “Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons” (2005 г.).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения и приложения. Она содержит 328 страниц, включая 6 страниц приложений, 127 рисунков, 5 таблиц и список литературы из 545 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, отмечена новизна полученных результатов и выводов, их достоверность, личный вклад автора, обосновывается научная и практическая значимость работы. Выделены основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 «Основные процессы и механизмы, определяющие пространственное распределение и баланс малых газовых примесей в атмосфере». В первой главе приводятся основные сведения о фотохимических и динамических процессах, оказывающих влияние на распределение и временную эволюцию атмосферных примесей. Конкретизируется понятие характерного времени фотохимической релаксации (ХВФР) примеси к состоянию фотохимического равновесия. Рассмотрены основные временные циклы примесей и дан краткий обзор современного состояния проблемы их изучения.

В разделе 1.1 на основе уравнения переноса примеси обсуждается роль динамических и фотохимических процессов в изменении содержаний примесей.

В разделе 1.2 получено аналитическое решение упрощенного дифференциального уравнения фотохимической эволюции озона с квадратичной нелинейностью. Параметрами решения являются фотохимически равновесная концентрация озона и ХВФР, которые выражаются аналитически через концентрации OH , HO_2 , H_2O_2 , NO , NO_2 , HNO_3 , CH_3O_2 , плотность воздуха и коэффициенты скоростей реакций. Рассчитаны широтно-высотные распределения этих параметров в зависимости от сезона с привлечением данных о других атмосферных примесях, полученных по расчетам на 2-мерной фотохимической модели SOCRATES (описана в главе 2).

В разделе 1.3 рассмотрены основные процессы динамического переноса примесей, действующие на глобальном и региональном масштабах. Дан обзор современного состояния научных знаний о процессах крупномасштабного переноса в стратосфере, влиянии на примеси тропосферной циркуляции и изменений высоты тропопаузы, тропосферно-стратосферном обмене, крупномасштабных модах циркуляции, обратных связях озона и атмосферной динамики.

В разделе 1.4 рассматриваются основные временные циклы содержания примесей. Обсуждается состояние знаний и современные проблемы сезонных

изменений, суточных вариаций, квазидвухлетних вариаций примесей, воздействие на атмосферу 11-летнего цикла солнечной активности и 27-суточного цикла коротковолновой солнечной радиации.

В разделе 1.5 приводится современная информация о многолетних изменениях и трендах стратосферного содержания озона и NO_2 , подробно освещена проблема многолетних изменений и трендов термических и циркуляционных характеристик мезосферы.

Глава 2 «Данные и методы исследования». Глава 2 содержит информацию о данных наблюдений, привлекавшихся для решения задач диссертационной работы, использованных численных и аналитических моделях атмосферы, методах анализа данных измерений и моделирования.

Раздел 2.1 приводит информацию об использованных данных наблюдений с указанием источника и, при необходимости, краткой характеристикой особенностей данных. Используются опубликованные среднезональные эмпирические модели широтно-высотных распределений и сезонных вариаций температуры и состава атмосферы (O_3 , CH_4 , N_2O , HNO_3), данные многолетних наземных измерений общего содержания озона (OCO) на станциях мировой озонметрической сети и со спутников (прибор TOMS), данные одновременных измерений вертикальных профилей озона и метеопараметров с помощью озонозондов, данные о вертикальных профилях озона по измерениям со спутника (прибор SBUV), результаты измерений приземной концентрации озона в Антарктиде (в основном, измерения автора), данные измерений стратосферного содержания NO_2 на Сети по обнаружению стратосферных изменений (NDSC) и с участием автора – в Антарктике, Атлантическом океане и на Звенигородской научной станции ИФА (ЗНС). Результаты измерений на ЗНС включают также данные о содержании NO_2 в приземном слое атмосферы. Кроме того, использовались данные о скорости экваториального стратосферного ветра, индексах крупномасштабных мод циркуляции, индексах солнечной активности из баз данных в Интернете, данные о спектральных потоках солнечной радиации по измерениям со

спутника UARS (предоставлены Ю. Лин из Центра космических исследований им. Е.О. Халберта в Вашингтоне).

В разделе 2.2 дано краткое описание применявшихся моделей. Это двумерная (высота-широта) численная модель фотохимии, радиации и динамики атмосферы SOCRATES, разработанная в Национальном центре атмосферных исследований США (NCAR) и частично усовершенствованная автором; трехмерная глобальная химико-климатическая модель HAMMONIA, разработанная недавно в Институте метеорологии им. Макса Планка в Гамбурге; одномерная фотохимическая модель атмосферы, разработанная автором для интерпретации результатов измерений содержания NO_2 в стратосфере; аналитическая двумерная (в координатах широта-долгота) модель бароклинной атмосферы с учетом озонных притоков тепла, разработанная автором на основе динамической модели, первоначально сформулированной А.М. Обуховым.

В разделе 2.3 описаны некоторые методы анализа, применявшиеся в данной работе, которые требуют определенных комментариев. Это метод амплитудно-фазовых характеристик, предложенный И.И. Моховым, вейвлетный анализ, спектральные методы высокого разрешения, кросс-спектральный анализ высокого разрешения, методы анализа нелинейной изменчивости: метод Грассбергера-Прокачча анализа размерности временного ряда и анализ отображения окружности.

Глава 3 «Анализ сезонных изменений содержания примесей в стратосфере». Эта глава посвящена анализу сезонных изменений содержания озона, NO_2 , N_2O , CH_4 , HNO_3 в атмосфере. Основным материалом для исследований послужили данные спутниковых, сетевых наземных и озонозондовых измерений, а также результаты измерений (с участием автора) содержания озона и NO_2 в Атлантике с корабля и многолетних измерений NO_2 на Звенигородской научной станции. Впервые выполнен анализ пространственной динамики основных фаз годового цикла содержания примесей, характеризующих различные режимы эволюции примесей в годовом

ходе. Для интерпретации части результатов анализа использованы модельные расчеты.

В разделе 3.1 проведена диагностика пространственно-временной динамики широтно-высотных полей озона, CH_4 , N_2O , HNO_3 в годовом ходе (ГХ) на основе данных спутниковых (эмпирические модели) и озонзондовых измерений с применением различных методов анализа, включая метод амплитудно-фазовых характеристик. Изучены амплитудные характеристики ГХ примесей, которые характеризуются эволюцией во времени границ областей увеличения или уменьшения содержания примеси на заданную величину относительно распределения примеси в конкретный месяц. Выполнен анализ динамики важных фазовых характеристик ГХ примесей: 0-фазы, или фазы роста, и π -фазы, или фазы уменьшения, соответствующих моментам пересечения кривой годового хода со среднегодовым режимом на стадиях роста (0-фаза) и уменьшения (π -фаза) содержания примеси, фаз экстремальных значений содержания примесей в ГХ, соответствующих годовым максимуму и минимуму. На рис. 1 для примера показана широтно-высотная динамика 0-фазы ГХ отношения смеси озона в стратосфере. Режим 0-фазы в верхней стратосфере южного полушария (ЮП) берет начало осенью в высоких широтах и распространяется к экватору, а затем вниз в направлении субтропической области в средней стратосфере, которой он достигает весной. В средних широтах ЮП происходит опускание режима 0-фазы в средней стратосфере, также с локализацией субтропической области. Запаздывание режима 0-фазы в субтропических широтах характерно и для северного полушария (СП). Существенное отличие от ЮП состоит в том, что в средней стратосфере СП режим 0-фазы распространяется из арктической области, где он наблюдается уже в первой половине зимы. В верхней стратосфере СП режим 0-фазы распространяется в течение осени от уровня 40 км над Арктикой в направлении экваториальной стратопаузы.

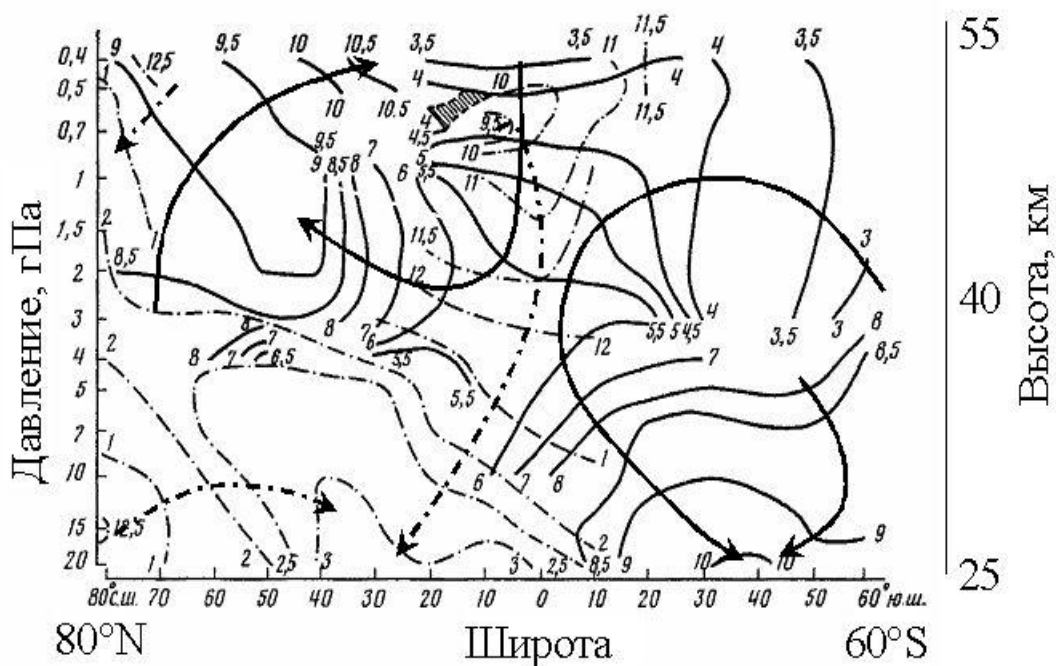


Рис. 1. Фаза роста отношения смеси стратосферного озона в годовом ходе по спутниковым данным. Целочисленные значения соответствуют середине месяца. Сплошные и штрих-пунктирные изолинии соответствуют разным семействам. Стрелки указывают направления распространения режима фазы роста.

Важно, что динамика разных фаз ГХ примесей может существенно, даже принципиально, различаться. Это зависит от степени ангармоничности ГХ. Ее анализ выполнен по структурным характеристикам ГХ – интервалам превышения (продолжительность времени в году, когда содержание примеси выше среднегодового) и роста (продолжительность времени в году, когда содержание примеси возрастает).

Анализ данных озонозондовых измерений выявил, что сезонные изменения содержания озона в тропосфере в зимне-весенний период определяются притоком озона из стратосферы. На основе проинтегрированного по тропосфере уравнения переноса озона получена оценка потока озона через тропопаузу во внетропических широтах СП, среднее значение которой для этих широт составило около 10^{11} мол/см² в секунду.

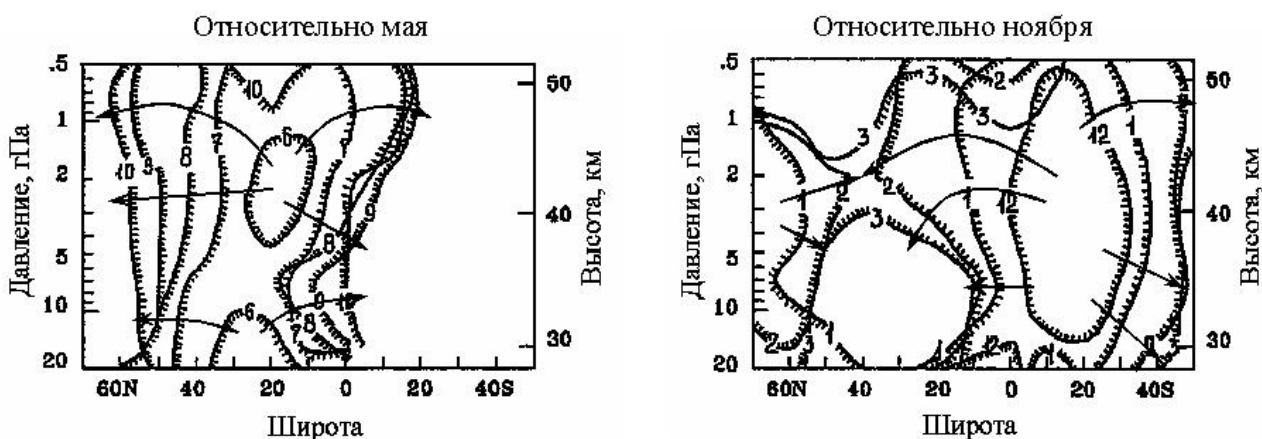


Рис. 2. Границы областей увеличения (со стороны заштрихованной части границ) отношения смеси N_2O на 1 млрд^{-1} в последующие месяцы относительно майского и ноябрьского распределений. Целочисленные значения соответствуют середине месяца.

Особенности эволюции в годовом ходе широтно-высотного поля стратосферного содержания закиси азота демонстрируются на рис. 2. На нем показаны границы областей увеличения отношения смеси N_2O на 1 млрд^{-1} относительно майского и ноябрьского распределений. Налицо важные межполушарные различия процессов роста концентрации N_2O . В течение северного полушарного лета фронт увеличения N_2O относительно майского распределения продвигается из тропиков в высокие широты СП. Распространение в направлении ЮП стабилизируется на экваторе. В течение южного полушарного лета происходит расширение области роста N_2O относительно ноябрьского распределения не только в средние широты летнего, ЮП, но и в средние широты зимнего, СП. При этом зимой в арктической стратосфере возникает изолированная область увеличения N_2O , граница которой продвигается в средние широты СП.

Диагностика ГХ примесей показала, что особенности динамики ГХ разных примесей в целом существенно различаются. Конкретные механизмы, ответственные за эти особенности, должны изучаться с привлечением численных моделей. В то же время результаты диагностики полезны для тестирования моделей. По результатам расчетов на 2-мерной фотохимической модели,

выполненных И.Л. Каролем и А.П. Кудрявцевым, получено достаточно хорошее качественное соответствие амплитудно-фазовых характеристик ГХ озона с нашими результатами.

Анализ амплитудно-фазовых характеристик ГХ температуры показал, что особенности ГХ озона в верхней стратосфере связаны с эволюцией поля температуры.

В разделе 3.2 выявлены региональные особенности ГХ ОСО по данным измерений на мировой озонметрической сети. По фазовым характеристикам ГХ выделены географические области наиболее раннего достижения разных фаз ГХ над северо-востоком Азии, Средней Азией и средними широтами Северной Америки. Среднеширотные области долготно соответствуют положениям зимних квазистационарных ложбин в поле геопотенциала в нижней стратосфере СП. С помощью аналитической двумерной озонно-динамической модели показано, что основные общие особенности широтно-долготной динамики фаз ГХ ОСО можно объяснить сезонной эволюцией квазистационарных планетарных волн.

В разделе 3.3 рассмотрены сезонные и суточные вариации стратосферного содержания NO_2 по данным многолетних утренних и вечерних измерений общего содержания (ОС) и вертикального распределения NO_2 на Звенигородской станции и по данным измерений ОС NO_2 на сети NDSC. Выявлены особенности широтного распределения ОС NO_2 в зависимости от сезона по измерениям с борта корабля (с участием автора). Получена широтная структура суточных и сезонных вариаций ОС NO_2 .

В данных измерений суточные вариации проявляются в разности утренних и вечерних значений содержания NO_2 при бóльших значениях вечернего содержания. Эта разность имеет ярко выраженный сезонный и широтный ход. Широтные максимумы разности во все сезоны находятся в окрестности 40°N и $40-45^\circ\text{S}$, где достаточно велики как содержание NO_2 , так и длительность дня и ночи. В процентном отношении они достигают 50-60%. Сезонные максимумы разности в этих поясах достигаются в СП летом, а в ЮП

– в конце весны - начале лета в окрестности годовых максимумов ОС NO₂. В полярных широтах величина разности между вечерними и утренними значениями ОС NO₂ мала, а в периоды летнего и зимнего солнцестояний практически отсутствует, в соответствии с фотохимическими представлениями.

Сезонный ход стратосферного содержания NO₂ примерно следует за годовым ходом солнечной инсоляции и характеризуется летним максимумом и зимним минимумом. Максимальные по СП и ЮП абсолютные значения ОС NO₂, превышающие по данным вечерних измерений $6 \cdot 10^{15}$ мол/см², наблюдаются в середине лета в окрестностях 40°N и 60°S, минимальные (менее 10^{15} мол/см²) – в середине зимы в северной и южной полярных областях.

Значительные сезонные вариации содержания NO₂ в стратосфере приводят к тому, что содержание NO₂ в летнем полушарии выше содержания NO₂ в зимнем полушарии. Этим объясняются глобальные закономерности полученных нами трех широтных разрезов ОС NO₂ в Атлантике и их сезонная зависимость. По этим измерениям выявлена также тонкая широтная структура ОС NO₂, которая определяется региональными, в том числе, динамическими процессами. В частности, особенности широтного распределения ОС NO₂ в разные сезоны связаны с положением и эволюцией стратосферного циркумполярного вихря и положением верхнетропосферного субтропического струйного течения.

Амплитуда годового хода ОС NO₂ минимальна на экваторе и практически монотонно нарастает с широтой. В полярных областях амплитуда ГХ достигает 80% от среднегодового значения ОС NO₂. На экваторе значение амплитуды менее 10%. В годовом ходе ОС NO₂ доминирует годовая гармоника, за исключением экватора, где амплитуды годовой и полугодовой гармоник сравнимы по величине.

После извержения в 1991 г. вулкана Пинатубо наблюдалась значительная отрицательная аномалия содержания NO₂ в стратосфере, длившаяся около 3-х лет. В абсолютных единицах максимальный эффект уменьшения ОС NO₂ отмечен летом и в процентном отношении по данным вечерних измерений

составил 20-25% на всех широтах. Процентное уменьшение утренних значений ОС NO₂ варьирует с широтой в пределах от 25 до 35%.

Глава 4 «Особенности временного режима содержания озона и NO₂ в полярных областях». Особенности временных режимов озона и NO₂ в полярных областях более подробно исследованы в 4-й главе. Изучались суточные, межсуточные и сезонные вариации. Наблюдательным материалом послужили данные озонозондовых измерений и результаты измерений содержания озона и NO₂ в Антарктике (с участием автора).

В разделе 4.1 анализируются особенности регулярных сезонных вариаций и внутригодовой изменчивости озона в полярных областях по данным озонного зондирования на станциях Алерт (82.5°N) и Резольют (75°N) в канадской Арктике и Сёва (62°S) и Амундсен-Скотт (Южный полюс) в Антарктиде. Выявлены особенности сезонной и внутрисезонной эволюции озона в полярных областях по сравнению со средними широтами.

Показано, в частности, что важную роль в динамике и внутригодовой эволюции тропосферного озона в Арктике играет приток озона из стратосферы в зимне-весеннее время. Однако, в отличие от средних широт СП, влияние стратосферно-тропосферного обмена в Арктике не распространяется на пограничный слой атмосферы, для которого характерна особая, обособленная от вышележащих слоев, внутригодовая эволюция O₃. Это указывает на динамическую изолированность пограничного слоя, при которой затруднен обмен озоном с вышележащими слоями атмосферы. На содержание и изменчивость озона в арктической стратосфере в отдельные годы оказывают сильное влияние внезапные зимние стратосферные потепления. Показано, что они могут вызывать не только увеличение, как считалось прежде, но и уменьшение концентрации озона в области потепления.

Доминирующая особенность сезонного хода стратосферного озона в антарктической стратосфере, начиная с 80-х гг. прошлого столетия, – значительный весенний дефицит озона в нижней стратосфере – т.н. «озонная дыра». Наряду с этим в диссертации показано, что сильное уменьшение

концентрации озона в стратосфере, сравнимое по величине и продолжительности с эффектом «озонной дыры», имело место и значительно раньше – в начале 70-х гг.

Корреляционный анализ концентрации O_3 , температуры, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра показал, что внутрисезонная изменчивость озона в полярных областях выше примерно 25 км в осенне-зимний период определяется вихревым переносом. Изменчивость O_3 в слое от уровней средней тропосферы до высот нижней стратосферы тесно связана с режимом циркуляции в окрестности тропопаузы; конкретные механизмы этой связи требуют изучения.

Раздел 4.2 посвящен сезонным и внутрисезонным изменениям двуокиси азота в Антарктике по данным измерений с активным участием автора в 1987/88 гг. на станциях Молодежная и Мирный и в 1989 г. в море Уэдделла, в результате которых впервые получены результаты о стратосферном содержании NO_2 в восточной Антарктиде и его изменениях. Показано, что финальное потепление в стратосфере над Антарктидой в начале декабря 1987 г. сопровождалось сильным увеличением OCO (на 100 е.Д.) и $OC\ NO_2$ (более чем в 3 раза, см. рис. 3). В последующий летне-осенний период происходит постепенное уменьшение OCO и $OC\ NO_2$, на которое наложены вариации, обусловленные синоптическими процессами.

По измерениям в сентябре-октябре 1989 г. с борта корабля в широтном поясе 62-66°S обнаружены значительные согласованные вариации $OC\ NO_2$ (до 100%) и температуры, обусловленные зональной волновой структурой стратосферного циркумполярного вихря и его эволюцией.

Таким образом, содержание и изменчивость $OC\ NO_2$ в Антарктике в весенний период ключевым образом зависят от интенсивности и положения стратосферного циркумполярного вихря. Большие градиенты концентрации NO_2 в области вихря в направлении периферии вихря вызывают значительную изменчивость $OC\ NO_2$ в неподвижной точке наблюдений при эволюции вихря. Сезонный рост $OC\ NO_2$ в Антарктиде отличается большой скоростью и

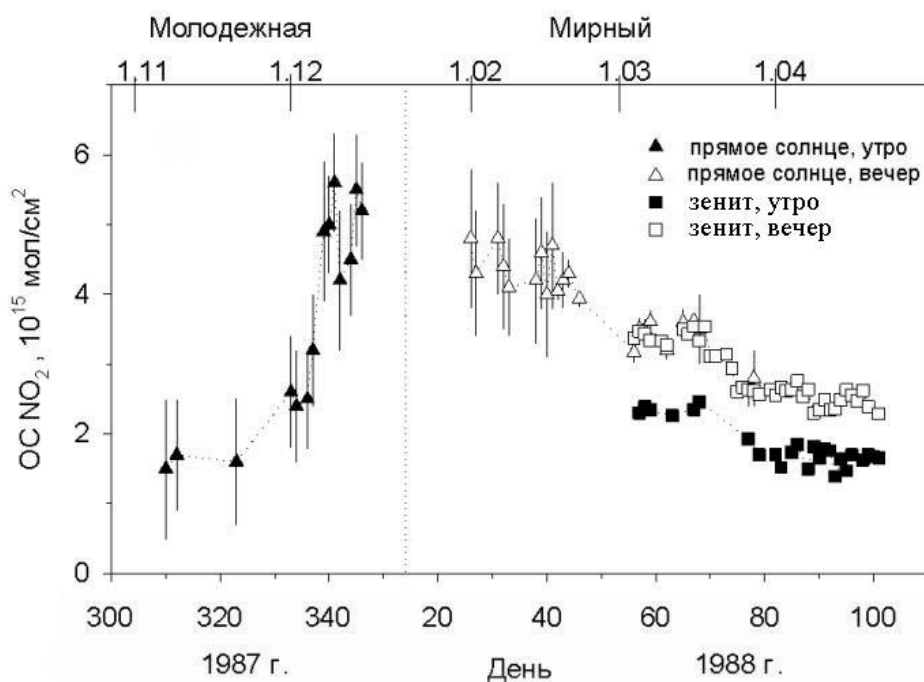


Рис. 3. Общее содержание NO_2 на станциях Молодежная (левая часть) и Мирный (правая часть) с ноября 1987 г. по начало апреля 1988 г. по данным измерений по прямому и рассеянному из зенита солнечному излучению. Вертикальными отрезками показаны случайные ошибки измерений.

определяется временем разрушения стратосферного вихря во время весенней перестройки циркуляции.

В разделе 4.3 исследуются механизмы изменчивости приземной концентрации озона в Антарктиде. Основная часть данных получена автором. По измерениям приземной концентрации озона на побережье Антарктиды исследованы внутрисуточные и межсуточные вариации озона. Выявлены различные режимы изменчивости приземного озона, обусловленные циклонической активностью и циркуляцией в системе стоковых ветров. Показано, что стоковый ветер осуществляет перенос озона в прибрежную зону с континента. Суточные вариации направления приземного ветра воздействуют на суточные вариации приземного озона.

Воздействие циркуляции, связанной со стоковыми ветрами, на приземный озон распространяется и на межсуточный масштаб. Обнаружена сильная положительная корреляция концентрации приземного озона с

температурой тропосферы выше пограничного слоя и антикорреляция с относительной влажностью. Это обусловлено вовлечением в сток влажного морского воздуха. Усиление режима стоковых ветров приводит к увеличению концентрации O_3 в приземном слое. Это подтверждается выполненными автором измерениями широтного распределения O_3 в приземном слое Антарктиды с самолета, которые показали, что приземная концентрация O_3 увеличивается при удалении вглубь континента.

Глава 5 «Квазидвухлетние вариации содержания озона и метеопараметров». Эта глава посвящена анализу квазидвухлетних вариаций скорости экваториального стратосферного ветра, концентрации озона, температуры, давления, скорости ветра в тропосфере и стратосфере северного полушария по данным многолетних сетевых радиозондовых и озонозондовых измерений и данным сетевых наземных измерений общего содержания озона.

В разделе 5.1 выполнен подробный и всесторонний анализ вариаций зональной скорости экваториального стратосферного ветра в слое 70-10 гПа. Обнаружены два режима квазидвухлетней цикличности (КДЦ) скорости ветра с периодами 2 и 2.5 года. Важно, что этот результат получен тремя независимыми методами: методом вейвлет-преобразования, путем спектрального анализа высокого разрешения и путем анализа отображения окружности. Наличие этих двух периодов подтверждается и существованием спектральных максимумов с периодами 12 и 6 мес, а также 15, 10 и даже 7.5 мес, соответствующими гармоникам основных периодичностей. Режимы колебаний со средними периодами 2 и 2.5 года периодически сменяют друг друга, примерно с периодом цикла солнечной активности. Наряду с этим в спектрах скорости экваториального стратосферного ветра обнаружены спектральные пики на периодах 20, 8 и 8.7 мес, соответствующих комбинационным частотам двух режимов КДЦ и годового цикла, которые можно объяснить взаимодействием КДЦ с годовым циклом в силу нелинейности уравнений гидротермодинамики.

Частоты двух основных режимов КДЦ находятся в дробно-рациональном отношении к частоте годового колебания ($1/2$ и $2/5$), указывая на синхронизацию КДЦ с годовым ходом. В качестве механизма синхронизации высказана возможность затягивания частоты и запираания фазы квазидвухлетних колебаний. Как известно, такие эффекты могут наблюдаться в нелинейных системах с периодической вынуждающей силой.

В разделе 5.2 рассмотрены квазидвухлетние вариации (КДВ) концентрации озона и метеопараметров (температуры, давления, зональной и меридиональной составляющих скорости ветра) по данным озонного зондирования в североамериканском (Канада) и западноевропейском регионах. С помощью спектрального анализа высокого разрешения показано, что квазидвухлетние вариации этих величин в тропосфере и стратосфере имеют периоды, которые группируются в окрестности определенных значений, чаще всего вблизи значений 2 и 2.5 года. В большинстве случаев значительны вариации с периодом около 20 мес, соответствующим одной из комбинационных частот (см. выше). Обнаружены важные, в ряде случаев принципиальные различия КДВ различных параметров на одной и той же станции, а также различия КДВ одного и того же параметра не только между регионами, но и в пределах одного и того же региона. Примеры спектров концентрации озона, температуры и зональной составляющей скорости ветра на двух канадских станциях Черчилль и Эдмонтон показаны на рис. 4.

Кросс-спектральный анализ высокого разрешения показал, что сложную картину и разнообразие квазидвухлетних эффектов можно объяснить комбинированным влиянием на внутропическую атмосферу КДЦ в экваториальной стратосфере, Эль-Ниньо–Южного колебания (ЭНЮК) и Северо-Атлантического колебания (САК). Физические механизмы воздействий этих факторов на различные параметры могут быть разными. Это объясняет различия КДВ разных параметров даже для одной и той же станции.

Вариации стратосферного озона с периодом около 2.5 лет в обоих регионах статистически связаны с аналогичными вариациями скорости ветра в

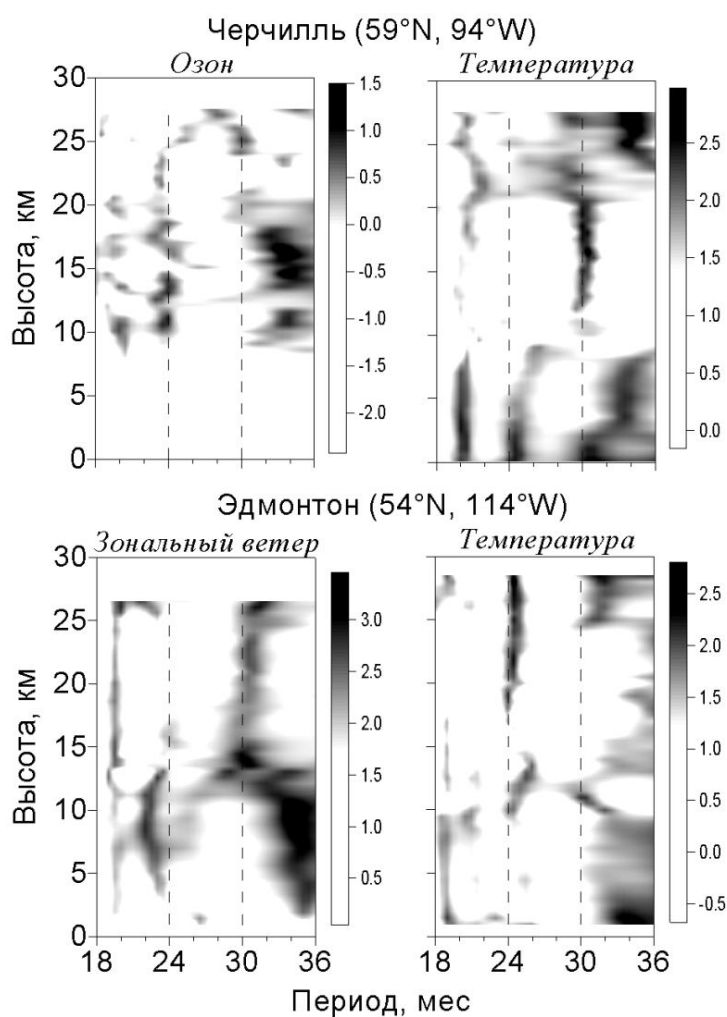


Рис. 4. Логарифм спектральной плотности мощности флуктуаций концентрации озона и температуры на станции Черчилль (59°N, 94°W) и зональной скорости ветра и температуры на станции Эдмонтон (54°N, 114°W). Единицы спектральной плотности: $(\text{мол}/\text{см}^3)^2 \cdot \text{мес}$ для концентрации озона, $\text{К}^2 \cdot \text{мес}$ для температуры, $(\text{м}/\text{с})^2 \cdot \text{мес}$ для скорости ветра.

КДВ озона характеризуются значительным фазовым сдвигом по вертикали (а в европейском регионе – и по горизонтали), что приводит к трудностям изучения КДВ в общем содержании озона.

экваториальной стратосфере и с вариациями индекса ЭНЮК. Двухлетние вариации озона в стратосфере над Западной Европой связаны с ЭНЮК, а 2-летние вариации озона в тропосфере – с САК. Выявлена более четкая связь 2.5-летних вариаций температуры с ЭНЮК, чем с экваториальной КДЦ. 2-летние вариации температуры в стратосфере и тропосфере объясняются вариациями ЭНЮК или САК. КДВ зональной и меридиональной составляющих скорости ветра в тропосфере и стратосфере над Канадой в большей мере, чем другие параметры, связаны с САК, которое влияет не только на 2-летние, но и на 2.5-летние вариации ветра. Однако над Западной Европой они определяются в первую очередь влиянием ЭНЮК.

В разделе 5.3 выполнен анализ квазидвухлетних вариаций ОСО по данным измерений на мировой озонметрической сети. Несмотря на отмеченные выше трудности, он представляет немалый интерес ввиду значительно большего количества станций наблюдения ОСО и возможности более подробного изучения горизонтальной неоднородности характеристик КДВ озона. Показано, что значения ОСО в периоды западной и восточной фаз экваториального стратосферного ветра различаются, и соответствующая разность ОСО сезонно зависима. Горизонтальное распределение КДВ ОСО можно описать в терминах сезонной эволюции этой разности $\Delta X = X_w - X_e$, где индексы "w" и "e" соответствуют западной и восточной фазам экваториального ветра на уровне 50 гПа. Отметим, например, уменьшение амплитуды и дробление крупномасштабной зональной структуры разности с изменением зонального волнового числа от 1 до 4 от зимы к лету. Для тропического пояса в целом характерны положительные, а для средних и высоких широт – отрицательные значения разности.

По результатам спектрального анализа высокого разрешения выявлены КДВ ОСО и вариации с комбинационной частотой. КДВ ОСО определяются в основном колебаниями с периодами 28–30 мес. Период вариаций с комбинационной частотой находится в окрестности 20 мес, а их амплитуда наиболее значительна в регионах, где существенна межсезонная эволюция границы раздела между тропическим поясом положительных значений ΔX и внетропическими областями с $\Delta X < 0$, и незначительна в регионах с квазистационарными аномалиями ΔX .

Глава 6 «Воздействие вариаций уровня солнечной активности на состав, температуру и динамику средней атмосферы». В этой главе исследуется воздействие вариаций уровня солнечной активности на состав, температуру и динамику средней атмосферы по данным наблюдений и с помощью численных моделей. Рассмотрен 11-летний цикл солнечной активности и 27-суточный цикл, обусловленный вращением Солнца вокруг своей оси.

Раздел 6.1 посвящен эффектам 11-летнего цикла солнечной активности (СА) в озоне и NO_2 . Обнаружены и проанализированы эффекты воздействия 11-летнего цикла СА на годовой ход стратосферного озона и получены оценки вклада динамического переноса в вариации концентрации стратосферного озона во внетропических широтах. Для анализа данных измерений ОСО на мировой озонометрической сети и ОС NO_2 на сети NDSC применялись статистические модели множественной линейной регрессии, учитывающие линейный тренд, эффекты СА, КДЦ, ЭНЮК, САК, воздействие вулканического аэрозоля после извержений вулканов Пинатубо и Эль-Чичон (только для NO_2). Для интерпретации результатов анализа использована 2-мерная модель фотохимических, радиационных и динамических процессов SOCRATES.

В результате показано, что изменение коротковолновой солнечной радиации в 11-летнем цикле СА воздействует на интенсивность меридионального переноса стратосферного озона в течение осенне-зимнего

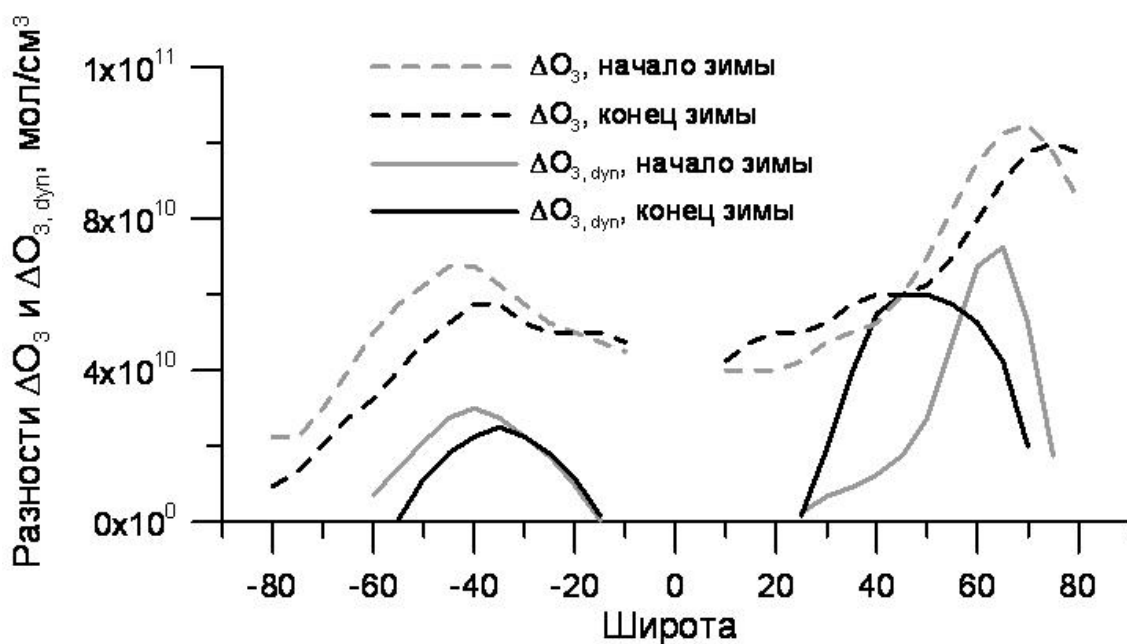


Рис. 5. Увеличение концентрации озона ΔO_3 и величины динамически обусловленного прироста концентрации озона $\Delta O_{3, \text{dyn}}$ на высоте 22 км в период максимума солнечной активности по сравнению с периодом минимума солнечной активности в начале и конце зимы по расчетам на модели SOCRATES.

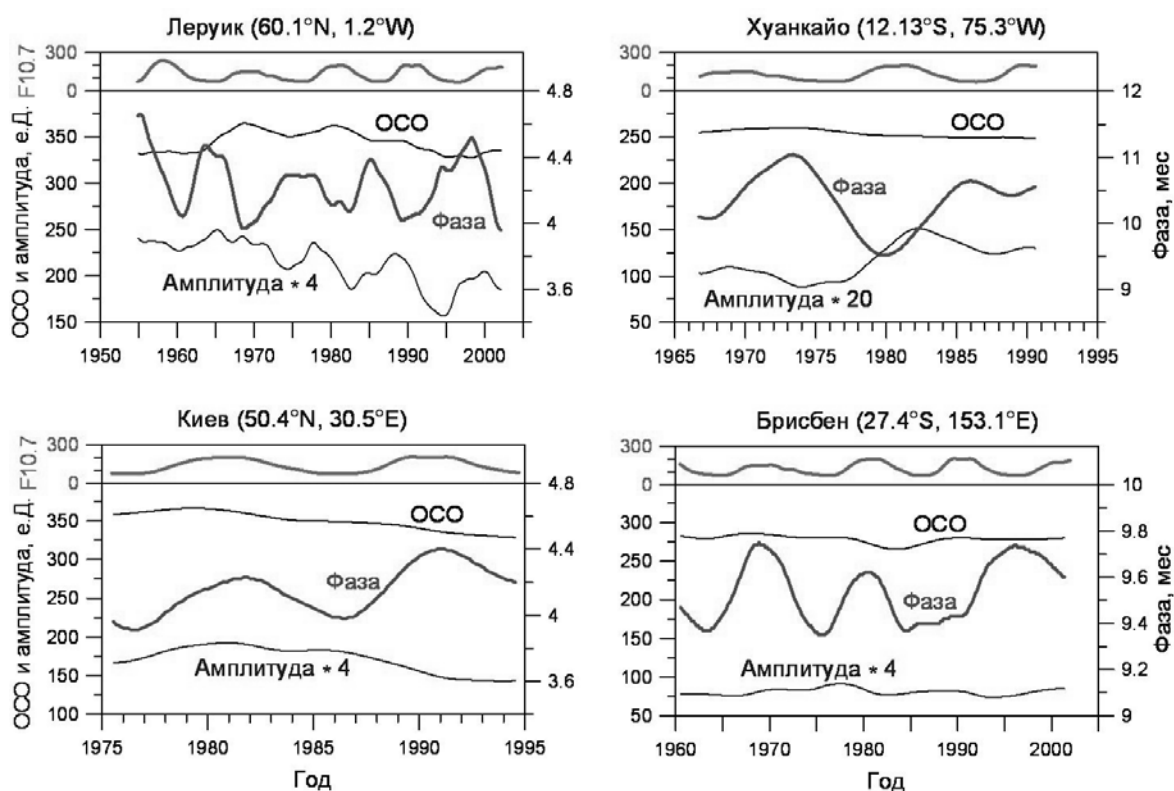


Рис. 6. Сглаженные скользящие 5-летние средние значения ОСО, амплитуды и фазы годовой гармоники ОСО на высокоширотной станции Леруик, тропической станции Хуанкайо, среднеширотной станции Киев и субтропической станции Брисбен. В верхних частях рисунков приведен сглаженный ход среднемесячных значений индекса солнечной активности $F_{10.7}$.

периода. Приток озона в средние широты возрастает при высоком уровне СА по сравнению с притоком в период минимума СА. По данным моделирования этот механизм обеспечивает до 30% зимнего увеличения содержания озона в слое озонового максимума (около 22 км) в средних широтах ЮП в условиях высокой СА (рис. 5). В средних широтах СП этот механизм вносит основной вклад в изменения содержания озона в этом слое во второй половине зимы при вариациях СА. Изменение величины притока стратосферного озона под действием вариаций СА отражается на годовом ходе озона.

Эффект СА в ОСО и характеристиках годового хода ОСО сильно зависит от региона. Выделены два характерных типа квазидесятилетних вариаций фазы годовой гармоники ОСО: в фазе и в противофазе с вариациями СА (рис. 6). Противофазные с солнечной активностью изменения фазы годовой гармоники

ОСО отмечены в высоких широтах Североатлантического региона и в тропическом поясе, а со-фазные изменения – в средних и субтропических широтах обоих полушарий. Эти широтные различия могут быть объяснены общим усилением динамического притока стратосферного озона во внетропические широты в период максимума СА по сравнению с периодом минимума СА, наряду со смещением в СП положения широтного максимума этого избыточного притока озона в течение зимы из высоких широт в средние широты (рис. 5).

Согласно данным наблюдений, в средних широтах обоих полушарий ОС NO_2 в период максимума СА в целом ниже, чем в период минимума СА. Разность достигает 12% на Звенигородской станции. Величина эффекта СА в средних широтах СП и ЮП уменьшается с уменьшением широты. В целом из анализа эффекта СА в NO_2 следует вывод о его региональной зависимости. Сопоставление с эффектом в ОСО показывает, что значительный отрицательный эффект СА в ОС NO_2 отмечен на станциях, которые расположены в регионах со значительным положительным эффектом СА в ОСО. Эффект СА в NO_2 по расчетам с помощью модели SOCRATES в целом соответствует по знаку результатам анализа данных наблюдений. Однако модельный эффект в несколько раз меньше, чем наблюдаемый на некоторых станциях. Вероятная причина расхождений – региональный характер проявления эффекта СА в содержании примесей, что невозможно учесть в двумерной модели.

В разделе 6.2 исследуется воздействие 27-суточных вариаций коротковолнового солнечного излучения на состав и термический режим средней и верхней атмосферы по результатам численного моделирования с помощью 3-мерной глобальной химико-климатической модели HAMMONIA. Анализ модельных результатов показал, что в то время как вариации температуры и примесей, вызванные воздействием 27-суточного солнечного цикла, очень отчетливы и постоянны в верхней атмосфере, в стратосфере и мезосфере они имеют сильно перемежающийся характер и, вероятно, зависят

от динамической обстановки. Получены широтно-высотные распределения чувствительности и фазовой задержки откликов температуры и химического состава атмосферы на 27-суточный солнечный цикл. Отклики во внетропических широтах, как правило, сезонно зависимы и во многих случаях сильнее зимой, чем летом. Чувствительности откликов нелинейно зависят от амплитуды солнечного воздействия, уменьшаясь с его усилением.

Чувствительность отклика озона максимальна в верхней атмосфере, где она может превышать 10% на 1% изменений потока солнечной радиации на длине волны 205 нм. В верхней стратосфере она может достигать 1%/%. Чувствительность термического отклика выше 110 км превышает 2 К на 1% изменений потока солнечной радиации на длине волны 205 нм, а ее значение в окрестности локального высотного максимума чувствительности в слое тропической стратосферы над порядком меньше.

Значения фаз откликов температуры и атмосферных примесей на 27-суточный солнечный цикл тоже зависят от высоты и широты. Например, температурный отклик в окрестности стратосферы и в термосфере происходит примерно в фазе с солнечным циклом, запаздывая по отношению к нему на 1-2 суток. Запаздывание увеличивается до 5 суток в верхней мезосфере. Концентрация озона над тропиками ниже 60 км изменяется примерно в фазе с солнечным циклом, опережая его в верхней части слоя на 1-2 суток, а выше 70 км – примерно в противофазе с солнечным циклом. Опережение обусловлено, в частности, температурной зависимостью скоростей реакций.

Чувствительность и фаза озонного отклика в стратосфере и нижней мезосфере в тропиках находятся в удовлетворительном согласии с имеющимися результатами наблюдений, в то время как выше 70-75 км имеются принципиальные различия между модельными и наблюдавшимися (только две серии данных) значениями фазы озонного отклика.

Что касается температурного отклика, то может быть несоответствие между характеристиками наблюдаемого отклика по данным разных авторов, но в то же время характеристики модельного отклика температуры в верхней

стратосфере и нижней мезосфере соответствуют некоторым наблюдениям. Однако нет никакого соответствия между расчетным и наблюдавшимся (только одна серия данных) температурными откликами выше 75 км. В настоящее время недостаточно экспериментальных данных для всестороннего сопоставления модельных и наблюдаемых эффектов 27-суточного солнечного цикла.

Модельные расчеты показали, что атмосферная циркуляция может оказывать важное воздействие на отклик атмосферы на 27-суточный солнечный цикл в средне- и высокоширотной стратосфере и мезосфере в зимний период.

Глава 7 «Эффекты долговременной изменчивости». В 7-й главе исследуются эффекты долговременной изменчивости содержания озона и NO_2 и термического режима мезосферы по данным наблюдений и с помощью численного моделирования.

В разделе 7.1 оцениваются линейные тренды характеристик годового хода (амплитуд и фаз гармоник) общего содержания озона по данным многолетних наземных измерений на мировой озонметрической сети. Оценки получены с помощью модели множественной линейной регрессии (описана в главе 6). Оказалось, что тренд фазы годовой гармоник ОСО, если он статистически значим, везде положительный. Но механизмы этого тренда в Антарктике и остальных областях разные. Величина тренда фазы на некоторых станциях достигает 8 сут, а на станции Сёва в Антарктиде – 18 сут за 10 лет. Амплитуда годовой гармоник ОСО со временем увеличивается в Антарктике и в тропической зоне, а в остальных местах она уменьшается. Во внетропических широтах тренд амплитуды годовой гармоник ОСО составляет по величине большую часть тренда среднегодового значения ОСО, что является результатом сезонной зависимости трендов ОСО. К выявленным трендам характеристик годового хода ОСО может приводить долговременное уменьшение ОСО в зимний период, предшествующий моменту годового максимума ОСО, а в Антарктиде – многолетнее уменьшение значений ОСО в

период весенней «озонной дыры» с одновременным смещением сроков «дыры» на более поздние даты.

В разделе 7.2 выполнен анализ линейных трендов ОС NO₂ по данным измерений на сети NDSC. Годовые и сезонные оценки трендов получены с помощью модели множественной линейной регрессии, учитывающей эффекты солнечной активности, Эль-Ниньо – Южного колебания, Североатлантического колебания и воздействие вулканического аэрозоля после извержений вулканов Пинатубо и Эль-Чичон. Впервые получена широтная структура трендов NO₂ (рис. 7). В средних и низких широтах ЮП тренды преимущественно положительные, в то время как в средних и низких широтах СП – преимущественно отрицательные. Максимальные значения положительных и отрицательных трендов составляют по модулю около 10% за 10 лет. Годовые оценки трендов в высоких и полярных широтах, как правило, статистически незначимые. В целом можно отметить антисимметричное распределение годовых оценок трендов относительно экватора. Сезонные оценки трендов могут отличаться от годовых. Так, зимой не только в ЮП, но и в СП в целом преобладают положительные значения трендов ОС NO₂. Летом статистически значимый тренд ОС NO₂ отмечен в Арктике.

По расчетам на 2-мерной модели SOCRATES получены небольшие отрицательные значения трендов ОС NO₂ в средних широтах обоих полушарий (рис. 7), что сильно расходится с результатами анализа данных наблюдений. Вероятная причина расхождений кроется во влиянии на фотохимические изменения стратосферного содержания NO₂ изменений температуры и состава стратосферы с различной степенью компенсации их эффектов в NO₂ в зависимости от конкретных, в том числе, региональных условий.

Раздел 7.3 посвящен моделированию долговременных изменений термического режима мезосферы. По ракетным данным и по измерениям гидроксильной эмиссии учеными из ИФА, Центральной аэрологической обсерватории и Абастуманской обсерватории обнаружено значительное охлаждение мезосферы и слоя мезопаузы (Golitsyn G.S., Semenov A.I., Shefov

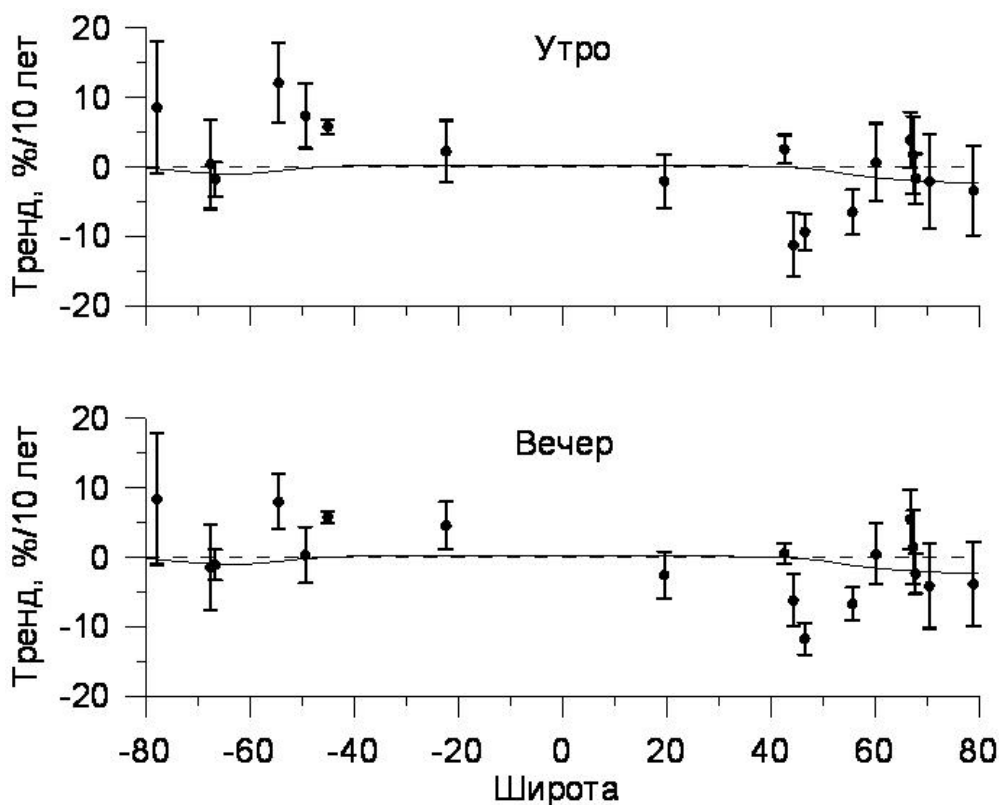


Рис. 7. Годовые оценки линейного тренда содержания NO_2 в вертикальном столбе атмосферы (точки) и их 95%-е доверительные интервалы (вертикальные отрезки) в зависимости от широты по данным утренних и вечерних измерений и по расчетам с помощью модели SOCRATES (кривые).

N.N., Fishkova L.M., Lysenko E.V., Perov S.P. Long-term temperature trends in the middle and upper atmosphere. *Geophys. Res. Lett.* V. 23. P. 1741-1744. 1996). Для выявления механизмов охлаждения нами были выполнены расчеты с помощью 2-мерной модели фотохимии, радиации и динамики атмосферы SOCRATES. Исследованы эффекты увеличения приземных концентраций парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O и хлор-фтор-углеродов) за последние 50 лет в соответствии с наблюдаемыми трендами, увеличение концентрации водяного пара в средней атмосфере, а также эффекты вероятных изменений активности внутренних гравитационных волн (ВГВ).

Модельные расчеты показали, что наблюдаемое увеличение концентраций парниковых газов по отдельности вызывает охлаждение мезосферы. Охлаждение, порождаемое ростом концентраций хлор-фтор-углеродов, связано в основном с уменьшением содержания озона.

Одновременное увеличение концентраций парниковых газов ведет к большому охлаждению, хотя отклик атмосферы в этом случае не есть арифметическая сумма индивидуальных эффектов. Общий эффект охлаждения в средней мезосфере составляет около 4-6 К. Ниже модельной мезопаузы (~90 км) он около 3-4 К, за исключением внетропических широт СП зимой, где этот слой охлаждается на 5-7 К. Однако величина охлаждения по модельным расчетам значительно меньше, чем по наблюдениям.

Эффект охлаждения значительно возрастает при усилении форсинга за счет ВГВ. Следует отметить, что форсинг за счет ВГВ в модели параметризуется. Расчеты показывают, что предписанное уменьшение ускорения зонального потока и диффузии за счет ВГВ обычно приводит к потеплению верхней мезосферы. Предписанное усиление ускорения и диффузии за счет ВГВ в большинстве случаев ведет к охлаждению этой области. На рис. 8 показан температурный отклик мезосферы в январе на 50-летнее увеличение приземных концентраций парниковых газов и одновременное усиление на 50% форсинга за счет ВГВ. В этом случае зимнее охлаждение верхней мезосферы во внетропических широтах СП достигает 7-15 К. Охлаждение летней мезопаузы менее 2 К, в хорошем согласии с результатами наблюдений.

Повышенный диффузионный перенос, вызванный обрушением ВГВ, ведет к увеличению содержаний примесей, чье отношение смеси уменьшается с высотой. Концентрации метана и водяного пара претерпевают значительное увеличение, на десятки процентов, в слое мезопаузы. В отличие от этого, обусловленная ВГВ диффузия не оказывает значительного влияния на концентрацию CO_2 , чье отношение смеси в средней атмосфере характеризуется малым вертикальным градиентом. Увеличение CO_2 почти полностью обусловлено увеличением приземной концентрации CO_2 , а не усилением диффузии за счет ВГВ.

Увеличение концентраций парниковых газов смещает радиационный баланс слоя верхней мезосферы и мезопаузы к более низким температурам.

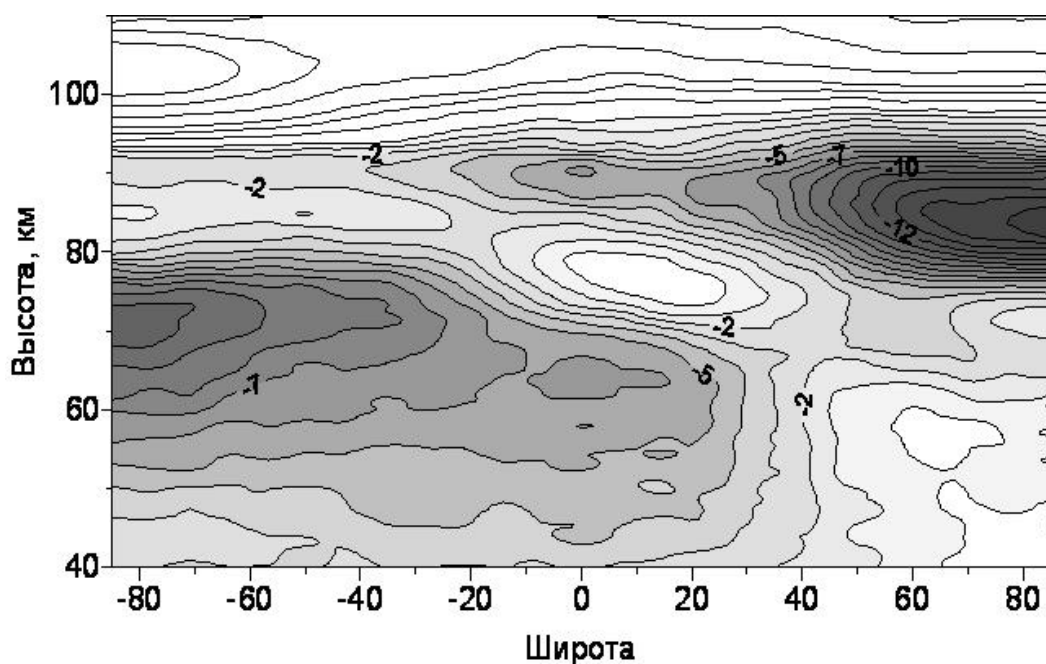


Рис. 8. Изменение температуры (К) в январе, вызванное увеличением концентраций парниковых газов за последние 50 лет и усилением ускорения и диффузии за счет ВГВ в 1.5 раза.

Другой эффект усиления связанной с ВГВ диффузии (которая обычно имеет место в слое мезопаузы) – это увеличение дивергенции направленного вниз диффузионного потока тепла, что также вызывает охлаждение. Этот механизм охлаждения мезопаузы более эффективен, если концентрации парниковых газов увеличиваются. Полученные модельные результаты предполагают, что изменения, вызванные ВГВ, могут быть так же важны при объяснении охлаждения верхней мезосферы и мезопаузы, как и наблюдаемые изменения концентраций парниковых газов. Следует также отметить, что модель не предсказывает каких-либо значительных изменений температуры в слое 92-95 км, в хорошем соответствии с наблюдениями.

Глава 8 «Спектральные и структурные закономерности пространственно-временной изменчивости примесей». Восьмая глава посвящена анализу спектральных и структурных закономерностей пространственно-временной изменчивости озона и NO_2 по данным сетевых и спутниковых измерений концентрации и общего содержания O_3 и измерений приземного содержания NO_2 на Звенигородской станции.

В разделе 8.1 рассмотрены спектральные закономерности временной изменчивости озона и NO_2 . На примере приземной концентрации озона на станции Хоэнпайсенберг показано, что спектры приземного озона в диапазоне периодов от часа до нескольких суток в различные сезоны подчиняются степенному закону с показателем, близким к $-5/3$.

Спектр содержания NO_2 в приземном слое атмосферы, рассчитанный по результатам измерений на ЗНС, подчиняется степенному закону -0.4 в диапазоне периодов от нескольких суток до нескольких месяцев. Такое низкое значение показателя степени обусловлено сильной межсуточной изменчивостью NO_2 в загрязненном приземном слое атмосферы.

Спектр самого длинного ряда наблюдений ОСО на станции Ароза (более 70 лет измерений) показывает, что на межгодовом и многолетнем масштабах ОСО испытывает квазирегулярные вариации, которые группируются в определенных диапазонах периодов. Как амплитуды, так и периоды этих вариаций непостоянны, а некоторые из вариаций могут со временем исчезать и появляться вновь. Выделяются две наиболее регулярные компоненты вариаций с периодами 1 и $1/2$ года. На межгодовом и многолетнем масштабах в спектре ОСО проявляются вариации с квазидвухлетним (в среднем ~ 28 мес), квазитрехлетним (~ 3.5 лет), квазипятилетним (~ 5.5 лет) и квазидесятилетним (~ 9.5 лет) периодами. Особо отметим сильную и очень четкую комбинационную компоненту с периодом около 20 мес. При этом важно, что на внутригодовом масштабе имеются вариации с другой комбинационной частотой ~ 8 мес.

В разделе 8.2 рассмотрены меридиональные структурные функции концентрации стратосферного озона для выявления статистических закономерностей горизонтального распределения озона. Для анализа использованы данные измерений отношения смеси озона с помощью аппаратуры SBUV со спутника Nimbus 7. На рис. 9 показан пример меридиональных структурных функции вдоль изобарической поверхности 50 гПа (~ 20.5 км). Видно их прекрасное соответствие степенному закону в диапазоне горизонтальных масштабов от 200 до 3300 км. В ряде случаев на

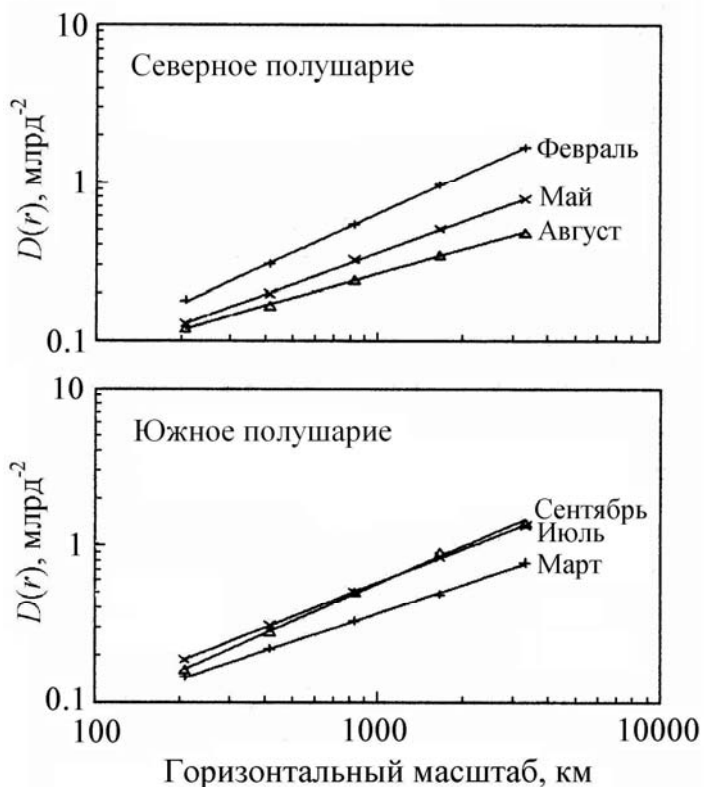


Рис. 9. Меридиональные структурные функции отношения смеси озона (символы) вдоль изобарической поверхности 50 гПа для трех месяцев в южном и северном полушариях и их аппроксимация степенной функцией (прямые).

большими масштабами. Тенденции связаны со структурами широтного распределения озона большого масштаба, в основном масштаба 3300 км, или 30° широты, а иногда масштаба 6600 км, или 60° широты.

В **Заключении** сформулированы основные выводы диссертации.

1. Проведены экспедиционные наблюдения содержания озона и NO_2 в Антарктике и в Атлантике и получен уникальный материал о временной изменчивости и широтном распределении этих примесей. Собран большой материал наблюдений содержания NO_2 в стратосфере и тропосфере на Звенигородской научной станции ИФА РАН.

2. На основе данных спутниковых, сетевых наземных и озонзондовых измерений ОСО и концентрации озона в тропосфере и

отдельных уровнях степенной закон выполняется до масштаба 6600 км. Степенной показатель структурных функций зависит от сезона и высоты и изменяется в пределах от 1 до 2. Такие высокие значения, по-видимому, связаны с наличием значительных пространственных градиентов среднего поля озона. Содержание озона проявляет довольно отчетливые тенденции изменений в широтном направлении с относительно малой изменчивостью на малых масштабах по сравнению с

стратосфере исследована пространственная динамика широтно-высотного поля концентрации озона и широтно-долготная динамика ОСО в годовом ходе. По данным спутниковых измерений проанализирована широтно-высотная динамика стратосферного содержания метана, закиси азота, азотной кислоты в годовом ходе. Изучены количественные характеристики и пространственная динамика различных фаз годового цикла примесей для наиболее важных стадий: в режимах роста и уменьшения содержания примеси, в режимах формирования годовых экстремумов. Получены пространственные распределения структурных характеристик годового хода примесей – интервалов роста и превышения.

3. С использованием данных озонозондовых измерений показано, что важнейшим фактором сезонных вариаций концентрации озона в тропосфере в средних и полярных широтах является перенос озона в тропосферу из стратосферы. Этот механизм имеет большее значение в северном полушарии.

4. По данным измерений автором концентрации озона в приземном слое атмосферы и ОС NO_2 в Антарктике изучены временные вариации содержания этих примесей в южной полярной области. Установлено, что одним из важных механизмов внутрисуточных и межсуточных вариаций приземного озона на побережье Антарктиды является циркуляция, связанная с режимом стокового ветра. Межсуточные вариации ОС NO_2 в Антарктике в весенний период определяются эволюцией стратосферного циркумполярного вихря.

5. На основе данных сетевых радиозондовых измерений скорости стратосферного ветра на экваторе и данных озонозондовых измерений концентрации озона, температуры, давления, направления и скорости ветра в тропосфере и стратосфере средних и полярных широт северного полушария выполнен всесторонний анализ квазидвухлетних вариаций этих параметров. Обнаружены два режима квазидвухлетней цикличности зональной скорости стратосферного экваториального ветра со средними периодами 2 и 2.5 года. Вариации с этими периодами обнаружены в концентрации озона, температуре, давлении, скорости ветра в стратосфере и тропосфере внетропических широт

северного полушария. Во всех этих параметрах и в ОСО обнаружены вариации с периодами около 20 и 8.5 месяцев, соответствующими комбинационным частотам квазидвухлетних вариаций и годового цикла. Показано, что квазидвухлетние вариации озона, температуры, давления, скорости ветра в тропосфере и стратосфере внетропических широт северного полушария обусловлены комбинированным влиянием Эль-Ниньо – Южного колебания, Североатлантического колебания и квазидвухлетней цикличности в экваториальной стратосфере.

6. По данным сетевых и спутниковых измерений и с помощью численных моделей выполнено исследование вариаций состава, температуры и динамики средней и верхней атмосферы под воздействием вариаций уровня солнечной активности. Обнаружены и проанализированы эффекты воздействия 11-летнего цикла солнечной активности на годовой ход стратосферного озона и получены оценки вклада динамического переноса в 11-летние вариации концентрации стратосферного озона во внетропических широтах северного и южного полушарий. Рассчитаны широтно-высотные распределения амплитудных и фазовых характеристик вариаций температуры и концентраций примесей (озон, гидроксил, окись азота, двуокись азота, азотная кислота и др.), вызванных 27-суточными вариациями солнечной радиации, обусловленными собственным вращением Солнца. Показано, что термический и химический отклик атмосферы на 27-суточные вариации солнечной активности имеет перемежающийся и нелинейный характер.

7. На основе данных измерений широтных распределений общего содержания NO_2 , выполненных с участием автора, выполнен анализ особенностей широтного распределения стратосферного содержания NO_2 в зависимости от сезона. По данным сетевых измерений содержания NO_2 и измерений с участием автора на Звенигородской станции получены и проанализированы широтная структура амплитудных и фазовых характеристик сезонных и квази-десятилетних вариаций содержания NO_2 в столбе стратосферы, а также широтная структура внутрисуточных вариаций и

линейных трендов стратосферного содержания NO_2 в зависимости от сезона. Установлено, в частности, что широтное распределение годовых оценок линейного тренда NO_2 во внетропических широтах примерно антисимметрично относительно экватора с преобладанием положительных значений тренда в южном и отрицательных значений в северном полушариях.

8. С помощью численного моделирования получены оценки долговременных изменений термического режима средней атмосферы в результате выброса в атмосферу парниковых газов и изменений активности внутренних гравитационных волн. Показано, что наблюдаемое увеличение концентрации углекислого газа, метана, закиси азота, хлор-фтор-углеродов в нижней тропосфере приводит к охлаждению слоя верхней мезосферы и мезопаузы на несколько градусов за 50 лет в зимнее время (до 5-7 К во внетропических широтах), в то время как охлаждение в летний сезон незначительное. Усиление активности внутренних гравитационных волн может значительно (до 2-х раз) увеличить эффект зимнего охлаждения этого слоя.

9. По данным спутниковых измерений концентрации стратосферного озона, сетевых наземных измерений приземной концентрации озона и измерений содержания NO_2 (с участием автора) в приземном слое на Звенигородской станции выполнен анализ спектральных и структурных закономерностей изменчивости примесей. Показано, что временные спектры мощности флуктуаций приземной концентрации озона в диапазоне периодов от нескольких часов до нескольких суток подчиняются степенному закону с показателем, близким к $-5/3$. Обнаружено, что спектр вариаций приземного содержания NO_2 , вызванных эпизодами загрязнения, в диапазоне периодов от нескольких суток до нескольких месяцев характеризуется значениями степенного показателя, значительно меньшими по модулю единицы (~ -0.4). Обнаружено, что меридиональные вариации концентрации озона в стратосфере в диапазоне горизонтальных масштабов от 200 до 6500 км подчиняются закону статистического самоподобия со степенным показателем структурной функции большим единицы, зависящим от высоты и сезона.

Основным итогом диссертационной работы следует считать решение крупной научной проблемы исследования особенностей и механизмов пространственно-временной изменчивости атмосферного озона и связанных с ним малых газовых составляющих, в результате которого впервые для большой совокупности пространственно-временных масштабов получены статистически значимые закономерности изменений примесей, необходимые для совершенствования современных представлений о климате средней и верхней атмосферы.

Основные публикации по теме диссертации:

1. **Груздев А.Н.** Влияние озонного нагревания на динамику планетарных волн // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1985. Т. 21. № 11. С. 1148-1159.
2. **Груздев А.Н.** О возможности влияния озона на динамику планетарных волн / В кн.: *Атмосферный озон. Труды VI Всесоюзного симпозиума*. Л.: Гидрометеиздат, 1987. С. 266-270.
3. **Груздев А.Н.**, Мохов И.И. Диагностика динамики стратосферного озона в годовом ходе по спутниковым данным // *Исследования Земли из космоса*. 1988. № 2. С. 3-10.
4. Арабов А.Я., **Груздев А.Н.**, Гиргждене Р.В., Еланский Н.Ф. Измерения приземной концентрации озона на антарктической станции Мирный // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1988. Т. 24. № 12. С. 1276-1281.
5. **Gruzdev A.N.**, Mokhov I.I. Peculiarities of global dynamics of total ozone in annual course from surface measurements / In: *Ozone in the Atmosphere*. Eds. R.D. Vojkov and P. Fabian. A.DEEPAC Publishing. 1989. P. 117-119.
6. **Груздев А.Н.**, Мохов И.И. Особенности внутригодовой глобальной динамики общего содержания озона // *Метеорология и гидрология*. 1990. № 7. С. 36-46.

7. **Груздев А.Н.**, Ситнов С.А. Особенности внутригодовой изменчивости озона в полярных областях по данным озонного зондирования на станциях Резольют и Амундсен-Скотт // *Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана*. 1991. Т. 27. № 4. С. 396-407.
8. **Gruzdev A.N.**, Karol I.L., Kudryavtsev A.P., Mokhov I.I., Sitnov S.A. Peculiarities of polar ozone annual course: analysis of satellite and ozonesonde data and model results // *Norsk Geologisk Tidsskrift*. 1991. V.71. No. 3. P. 183-187.
9. Елохов А.С., **Груздев А.Н.** Измерения общего содержания озона и двуокси азота на антарктических станциях Молодежная и Мирный весной 1987 - осенью 1988 гг. // *Оптика атмосферы*. 1991. Т. 4. № 9. С. 1006-1009.
10. **Груздев А.Н.**, Елохов А.С. Приземное содержание озона на антарктических станциях Молодежная и Мирный по измерениям весной 1987 г. - осенью 1988 г. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 1992. Т. 28. № 1. С. 55-63.
11. **Груздев А.Н.**, Мохов И.И. Квазидвухлетняя цикличность в глобальном поле общего содержания озона по данным наземных измерений // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 1992. Т. 28. № 5. С. 475-486.
12. Елохов А.С., **Груздев А.Н.** Широтное распределение общего содержания озона и двуокси азота над Атлантикой по измерениям в мае 1988 г. // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 1992. Т. 28. № 7. С. 739-744.
13. **Груздев А.Н.**, Ситнов С.А. Годовой ход тропосферного озона и оценки тропосферно-стратосферного обмена в Арктике и Антарктике по данным озонного зондирования // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 1992. Т. 28. № 9. С. 943-952.
14. **Gruzdev A.N.**, Elokhov A.S., Makarov O.V., Mokhov I.I. Some recent results of Soviet measurements of surface ozone in Antarctica: A meteorological interpretation // *Tellus*. 1993. V. 45B. № 2. P. 99-105.
15. **Gruzdev A.N.**, Sitnov S.A. Tropospheric ozone annual variation and possible troposphere-stratosphere coupling in the Arctic and Antarctic as derived from

- ozone soundings at Resolute and Amundsen-Scott stations // *Tellus*. 1993. V. 45B. № 2. P. 89-98.
16. Elokhov A.S., **Gruzdev A.N.** Spectrometric measurements of total NO₂ in different regions of the globe // *Proceedings of SPIE*. 1993. V. 2107. P. 111-121.
 17. **Груздев А.Н.**, Ситнов С.А. Анализ годового хода тропосферного и стратосферного озона по данным озонозондов // *Известия АН. Физика атмосферы и океана*. 1994. Т. 30. № 4. С. 491-500.
 18. **Груздев А.Н.**, Ситнов С.А. Характеристики внутригодовой изменчивости вертикального распределения озона по данным озонозондов // *Известия АН. Физика атмосферы и океана*. 1995. Т. 31. № 1. С. 69-76.
 19. **Gruzdev A.N.**, Mokhov I.I. Characteristics of intra-annual variations of N₂O and CH₄ in the middle atmosphere // *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*. 1994. V. 56. № 9. P. 1095-1098.
 20. **Gruzdev A.N.**, Mokhov I.I. Analysis of satellite measurements of ozone, N₂O and CH₄: annual and semiannual variations in the stratosphere // *Polar Research*. 1994. V. 13. № 1. P. 13-22.
 21. **Gruzdev A.**, Mokhov I. Quasi-biennial oscillation in total ozone: Global behavior derived from ground-based measurements / In: *Ozone in the Troposphere and Stratosphere*. Pt.1 (R.D. Hudson, ed.). 1994. P. 397-400.
 22. Sitnov S., **Gruzdev A.** Manifestation of quasi-biennial oscillations in ozone vertical distribution / In: *Ozone in the Troposphere and Stratosphere*. Pt.1 (R.D. Hudson, ed.). 1994. P. 393-396.
 23. Elokhov A.S., **Gruzdev A.N.** Total ozone and total NO₂ latitudinal distribution derived from measurements in the Atlantic Ocean in May 1988 / In: *Ozone in the Troposphere and Stratosphere*. Pt.2 (R.D. Hudson, ed.). 1994. P. 695-698.
 24. **Gruzdev A.N.** Possible changes in the dose of biologically active ultraviolet radiation received by the biosphere in the summertime Arctic due to total ozone interannual variability // *The Science of the Total Environment*. 1995. V. 160/161. P. 669-675.

25. Elokhov A.S., **Gruzdev A.N.** Estimation of tropospheric and stratospheric NO₂ from spectrometric measurements of column NO₂ abundances // *Proceedings of SPIE*. 1995. V. 2506. P. 444-453.
26. **Груздев А.Н.**, Макаров О.В. Анализ нелинейной изменчивости в рядах измерений приземной концентрации озона в Антарктиде // *Известия АН. Физика атмосферы и океана*. 1996. Т. 32. № 1. С. 101-107.
27. Ситнов С.А., **Груздев А.Н.** Анализ квазидвухлетней цикличности в вертикальных распределениях озона и метеопараметров по данным озонозондов // *Известия АН. Физика атмосферы и океана*. 1996. Т. 32. № 3. С. 370-382.
28. Голицын Г.С., Арефьев В.Н., Гречко Е.И., **Груздев А.Н.**, Еланский Н.Ф., Елохов А.С., Семенов В.К. Газовый состав атмосферы и его изменения // *Оптика атмосферы и океана*. 1996. Т. 9. № 9. С. 1214-1232.
29. **Груздев А.Н.**, Ситнов С.А. Различия вертикальных распределений озона и метеопараметров в фазах квазидвухлетней цикличности (по данным озонозондов) // *Известия АН. Физика атмосферы и океана*. 1997. Т. 33. № 1. С. 91-103.
30. **Gruzdev A.N.** Scale invariance of meridional distributions of stratospheric ozone // *Advances in Space Research*. 1997. V. 19. P. 607-610.
31. **Gruzdev A.N.** Long-term variations and trends in the total ozone annual cycle / *Proceedings of the First SPARC General Assembly (Melbourne, Australia, 2-6 December 1996)*. 1997. V. 1. P. 205-208.
32. Bezverkhny V.A., **Gruzdev A.N.** Long-term variations in interannual quasi-periodicities of total ozone / *Proceedings of the First SPARC General Assembly (Melbourne, Australia, 2-6 December 1996)*. 1997. V. 1. P. 209-212.
33. **Gruzdev A.N.**, Bezverkhny V.A. Estimation of possible trends in ozone flux across the tropopause. *Proceedings of the First SPARC General Assembly (Melbourne, Australia, 2-6 December 1996)*. 1997. V. 2. P. 378-381.

34. Безверхний В.А., **Груздев А.Н.** Долговременные вариации квазидвухлетней цикличности атмосферного озона и скорости экваториального стратосферного ветра // *Доклады АН.* 1998. Т. 363. № 1. С. 110-113.
35. Elokhov A.S., **Gruzdev A.N.** Measurements of column contents and vertical distribution of NO₂ at Zvenigorod Scientific Station // *Proceedings of SPIE.* 1998. V. 3583. P. 547-554.
36. **Груздев А.Н.**, Безверхний В.А. Многолетние вариации квазидвухлетней цикличности экваториального стратосферного ветра // *Известия АН. Физика атмосферы и океана.* 1999. Т. 35. № 6. С. 773-785.
37. Елохов А.С., **Груздев А.Н.** Измерения общего содержания и вертикального распределения NO₂ на Звенигородской научной станции // *Известия АН. Физика атмосферы и океана.* 2000. Т. 36. № 6. С. 831-846.
38. **Gruzdev A.N.**, Bezverkhny V.A. Two regimes of the quasi-biennial oscillation in the equatorial stratospheric wind // *Journal of Geophysical Research.* 2000. V. 105. No. D24. P. 29435-29443.
39. Elokhov A.S., **Gruzdev A.N.** Ground-based spectrometric measurements of vertical distribution of NO₂: Ten years of observations at Zvenigorod Scientific Station / In: *IRS 2000: Current Problems in Atmospheric Radiation*, W. L. Smith and Yu. M. Timofeyev (Eds.). A. Deepak Publishing, Hampton, Virginia. 2001. P. 859-863.
40. Елохов А.С., **Груздев А.Н.** Наблюдения загрязнения нижней тропосферы в районе Звенигорода двуокисью азота по данным десятилетних спектрометрических измерений / *Вторая международная конференция "Состояние и охрана воздушного бассейна и водно-минеральных ресурсов курортно-рекреационных регионов". Кисловодск, 8-14 октября 2000 г. Сборник докладов.* Кисловодск, 2001. С. 72-80.
41. **Груздев А.Н.**, Елохов А.С. Тренды содержания NO₂ в стратосфере над Звенигородом // *Доклады АН.* 2002. Т. 382. № 5. С. 678-681.

42. **Груздев А.Н.**, Безверхний В.А. Об источниках квазидвухлетней цикличности в атмосфере северного полушария // *Доклады АН*. 2003. Т. 389. № 4. С. 528-531.
43. **Gruzdev A.N.**, Bezverkhny V.A. About sources of quasi-biennial variations in the Northern Hemisphere extratropical atmosphere / *Proc. XX Quadrennial Ozone Symposium, 1-8 June 2004, Kos, Greece*. 2004. P. 341-342.
44. **Gruzdev A.N.**, Elokhov A.S., Brasseur G.P. Trends in stratospheric column NO₂ at Zvenigorod, Russia / *Proc. XX Quadrennial Ozone Symposium, 1-8 June 2004, Kos, Greece*. 2004. P. 963-964.
45. **Gruzdev A.N.**, Elokhov A.S. Spectrometric measurements of NO₂ in the near-surface layer at Zvenigorod, Russia / *Proc. XX Quadrennial Ozone Symposium, 1-8 June 2004, Kos, Greece*. 2004. P. 965-966.
46. **Груздев А.Н.**, Безверхний В.А. Квазидвухлетняя цикличность в атмосфере над Северной Америкой по данным озонозондов // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2005. Т. 41. № 1. С. 36-50.
47. **Gruzdev A.N.**, Brasseur G.P.. Long-term changes in the mesosphere calculated by a two-dimensional model // *Journal of Geophysical Research*. 2005. V. 110. No. D3. D03304, doi:10.1029/2003JD004410.
48. **Gruzdev A.N.**, Elokhov A.S. Ground-based spectrometric measurements of vertical distribution and column abundance of NO₂ at Zvenigorod, Russia // *Proceedings of SPIE*. 2005. V. 5832. doi:10.1117/12.619837. P. 292-299.
49. Pyle J., Shepherd Th., Bodeker G., Canciani P., Dameris M., Forster P., **Gruzdev A.**, Müller R., Muthama N.J., Pitari G., Randel W. Ozone and climate: A review of interconnections / In: *Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System. Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons. IPCC Special Report. IPCC*. 2005. P. 83-132.
50. **Груздев А.Н.**, Безверхний В.А. Квазидвухлетние вариации озона и метеопараметров над Западной Европой по данным озонного зондирования // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2006. Т. 42. № 2. С. 224-236.

51. **Груздев А.Н.**, Брассёр Г.П. Воздействие 11-летнего цикла солнечной активности на характеристики годового хода общего содержания озона // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2007. Т. 43. № 3. С. 379-391.
52. **Груздев А.Н.** Широтная структура трендов и эффекта солнечной активности в стратосферном содержании NO₂ // *Доклады АН*. Т. 416. № 1. 2007.
53. **Груздев А.Н.** Широтная структура вариаций стратосферного содержания NO₂ // *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 2008. Т. 44.